SHILAP Revta. lepid., 41 (162), junio 2013: 267-286 CODEN: SRLPEF ISSN: 0300-5267

Predicción de los impactos del cambio climático en la distribución sobre las especies de Lepidoptera. El caso del género *Boloria* Moore, 1900 en la Península Ibérica (Lepidoptera: Nymphalidae)

H. Romo, P. Sanabria & E. García-Barros

Resumen

El cambio climático está afectando a los rangos de distribución de los Lepidoptera, lo que podría afectar más a especies propias de montaña en zonas templadas como el sur de Europa. El presente estudio pretende analizar el género *Boloria* Moore, 1900 en la Península Ibérica, ya que comprende varias especies de alta montaña, mediante el uso de modelos predictivos bajo diferentes escenarios climáticos (para los años 2020, 2050 y 2080). Los resultados obtenidos fueron significativos (p=0,05), con valores de AUC (Area Under a Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve) superiores a 0,9 lo que indica que las predicciones fueron mejores que las obtenidas al azar. Las variables climáticas que mostraron mayor influencia en los modelos fueron la precipitación del trimestre más cálido y la temperatura media del trimestre más seco. Nuestros modelos muestran una tendencia general a la reducción del área de distribución favorable en todos los escenarios para todas las especies, llegando éstas incluso a desaparecer en 2080 en algunos casos, como *B. pales* y *B. napaea.* El cambio climático puede estar afectando negativamente a este género, por lo que sería pertinente hacer un seguimiento de estas especies particularmente sensibles para comprobar en un plazo más corto si estas tendencias se confirman.
PALABRAS CLAVE: Lepidoptera, Nymphalidae, *Boloria*, cambio climático, AUC, MaxEnt, precipitación, temperatura, Península Ibérica.

**Predicting climate change impacts on Lepidoptera species distribution.
The case of genus *Boloria* Moore, 1900 in the Iberian Peninsula
(Lepidoptera: Nymphalidae)**

Abstract

Climate change is affecting the geographic ranges of Lepidoptera. Such changes are presumably more marked in mountain species in areas such as southern Europe. The present study tries to analyze the genus *Boloria* Moore, 1900, in the Iberian Peninsula since it comprises several mountain species. Different predictive models were applied considering all the Iberian species in the genus and three different climatic scenarios (the years 2020, 2050 and 2080). The results obtained were significant (p= 0.05) and AUC values (Area Under a Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve) were higher than 0.9. AUC values obtained indicate that the predictions were better than random predictions. The most significant variables in the models were "raifall of the warmest quarter of the year" and "mean temperature of the driest quarter". Our models show that there is a general tendency towards a decrease of favorable distribution areas in all future scenarios for all species, going as far as extinction in 2080 in some cases, such as *B. pales* and *B. napaea*. Climate change may be affecting this genus negatively so that it would be appropriate to closely monitor these particularly sensitive species to determine, within a shorter time frame, whether these trends are confirmed.
KEY WORDS: Lepidoptera, Nymphalidae, *Boloria*, climatic change, AUC, MaxEnt, precipitation, temperature, Iberian Peninsula.

Introducción

Lepidoptera es uno de los órdenes de insectos con mayor número de especies descritas (GULLAN & CRANSTON, 2005). En los últimos años se ha observado una retracción del área ocupada por ciertas especies (WILSON *et al*., 2007). Estas disminuciones pueden estar causadas por cambios en el uso del suelo y el manejo del territorio (NEW *et al*., 1995), por la introducción de especies alóctonas (DIDHAM *et al*., 2007) o por el cambio climático (PARMESAN *et al*., 1999; HILL *et al*., 2002; THOMAS *et al*., 2004) entre otros. Todo ello se traduce en efectos tales como aislamiento, fragmentación y pérdida de hábitats favorables, ya documentados para diversas especies del grupo (VAN SWAAY &WARREN, 1999; WARREN *et al*., 2001; STEFANESCU *et al.,* 2011).

De los factores anteriormente mencionados, el efecto del calentamiento global en especies de diferentes grupos taxonómicos es actualmente objeto de especial atención (por ejemplo THOMAS *et al.,* 2004; ARAÚJO *et al*., 2011; FELICÍSIMO, 2011; STEFANESCU *et al.,* 2011). En las últimas décadas ha tenido lugar una alteración importante de las condiciones atmosféricas que no parecen relacionarse con la "variabilidad climática natural" (cambios en el clima que se han ido dando en la historia de la tierra por variaciones de ciclos dinámicos naturales). De ello puede deducirse que el cambio climático es debido a otras causas además de las naturales, siendo una de las principales la actividad humana, aspecto sobre el que existe ya un amplio consenso (ORESKES, 2004) por ser el hombre el responsable del aumento de emisión de gases de efecto invernadero (IPCC, 2001) que tiene consecuencias en la circulación del aire atmosférico, en el patrón de precipitaciones e incluso en el nivel del mar por deshielo de los glaciares, estableciéndose una destacada tendencia de aumento de la temperatura global. Si esta tendencia permanece en el tiempo, podría convertirse en una seria amenaza para las poblaciones de Lepidoptera en Europa (VAN SWAAY & WARREN, 1999; THOMAS *et al*., 2004). En comparación con muchos vertebrados, las poblaciones de estos insectos parecen especialmente proclives a oscilaciones anuales provocadas por factores demográficos relacionados con variables medioambientales (POLLARD, 1988; ROY *et al*., 2001). Ciertas características, como el hecho de poseer un ciclo de vida corto, confieren a los Lepidoptera gran sensibilidad ante variaciones en su hábitat; ello los convierte en buenos indicadores de cambio climático (POLLARD, 1988; PARMESAN, 2003; STEFANESCU *et al*., 2003). Por ello el análisis de los factores que condicionan su distribución geográfica constituye una herramienta útil para comprender las tendencias de la biodiversidad a gran escala (THOMAS, 2005; VAN SWAAY *et al*., 2006).

Las distribuciones de las mariposas diurnas están condicionadas por multitud de factores, ya sean climáticos (HAWKINS *et al.,* 2003) como los que se trata de comprobar su efecto en este estudio, o de otro tipo como ambientales o bióticos (p.ej. competencia y depredación). Debido a esta complejidad, y por la dificultad de delimitar las áreas de distribución de las especies con suficiente precisión, en especial en zonas insuficientemente estudiadas, se hace tentador recurrir a modelos predictivos para estimar las distribuciones potenciales (ROMO *et al*., 2006; JIMÉNEZ-VALVERDE *et al.,* 2008). Estos modelos se utilizan porque indican la idoneidad del hábitat para el desarrollo de poblaciones de una especie concreta a partir de sus datos de presencia (o ausencia) (ARAÚJO & GUISAN, 2006; FERRIER & GUISAN, 2006); permiten, además, evaluar la influencia de diversos factores climáticos sobre la distribución de las especies. Entre los modelos y escenarios aplicables, los más comunes son las proyecciones de las distribuciones a los años 2020, 2050 y 2080, eficaces para determinar distribuciones potenciales admitiendo cierto margen de error en los datos (PEARSON & DAWSON, 2003; BENITO DE PANDO & PEÑAS DE GILES, 2007; PINEDA & LOBO, 2009). La validación es en cualquier caso problemática, ya que no se puede comprobar fácilmente algo que todavía no ha pasado (ARAÚJO *et al.*, 2005). En muchos casos tendremos que contentarnos con una valoración independiente de cualquier conjunto de datos. Como los Lepidópteros de ambientes montañosos parecen ser más susceptibles al cambio climático (BENISTON *et al.,* 1997), en este estudio se seleccionó el género *Boloria* Moore 1990 (superfamilia Papilionoidea, familia Nymphalidae), representado en la Península Ibérica por seis especies que son características de altitudes y latitudes elevadas. Para la realización de los modelos se utilizó el programa informático MaxEnt, que presenta

ventajas cuando sólo se poseen presencias como datos de partida (PHILIPS *et al.,* 2006) y debido a que se encuentra entre los métodos más fiables de modelización (ELITH *et al.*, 2006; BENITO DE PANDO & PEÑAS DE GILES, 2007) tanto para predicciones basadas en condiciones actuales como futuras (HIJMANS & GRAHAM, 2006).

Los objetivos de este estudio consisten en: 1) elaborar mapas de distribución potencial de las especies pertenecientes al género *Boloria* a partir de datos actualizados de distribución conocida; y 2) determinar la posible influencia del cambio climático en la distribución de este género en el futuro mediante dos escenarios climáticos diferentes utilizando las proyecciones generadas para los años 2020, 2050 y 2080.

Material y métodos

Área de estudio, representación geográfica y grupo taxonómico

El área de estudio lo constituye la Península Ibérica, utilizándose para la representación de la distribución de las especies el sistema de proyección de coordenadas UTM (*Universal Transverse Mercator*) con redes de malla de 10 km de lado.

El género *Boloria* (Papilionoidea, Nymphalidae) está representado por seis especies peninsulares: *Boloria dia* (Linnaeus, 1767), *B. eunomia* (Esper, 1800) *B. selene* ([Denis & Schiffermüller], 1775), *B. euphrosyne* (Linnaeus, 1758), *B. pales* ([Denis & Schiffermüller], 1775) y *B. napaea* (Hoffmansegg, 1804). Para la nomenclatura de las especies se utilizó el catálogo de VIVES-MORENO (1994). Todas ellas se distribuyen por la región septentrional de la Península Ibérica, alcanzando en ocasiones el centro de la misma (GARCÍA-BARROS *et al.*, 2004). Presentan un rango altitudinal de entre 900 y 2.900 m, aunque algunas especies como *B. euphrosyne* o *B. dia* pueden encontrarse también a altitudes más bajas. *B. eunomia, B. pales* y *B. napaea* son las especies que alcanzan rangos altitudinales más elevados.

Los datos de distribución proceden de la base de datos de presencias de mariposas compilados por GARCÍA-BARROS *et al.* (2004). Estos datos se actualizaron para el género *Boloria* con diversas publicaciones hasta el año 2010. La base de datos utilizada cuenta con 4.711 registros, de los cuales 1.979 eran referentes a la especie *B. dia*, 1.242 a *B. selene*, 985 a *B. euphrosyne*, 56 a *B. eunomia,* 431 a *B. pales*, y 18 a *B. napaea.*

Variables climáticas

Para la realización de los modelos de distribución potencial actual se utilizaron las 19 variables bioclimáticas (BIOCLIM) del presente procedentes de la base de datos de WorldClim -disponible en http://www.worldclim.com y descritas por HIJMANS *et al*. (2005)-, con una resolución de 5 minutos (que es la resolución que más se asemeja a la de los datos de presencia de las especies medidas en cuadrículas de 10x10 km de lado). Estas variables bioclimáticas son el resultado de recopilaciones de medidas mensuales de distintas variables de temperatura y precipitación llevadas a cabo entre el año 1950 y 2000 por un gran número de estaciones meteorológicas repartidas por todo el mundo, con el objetivo de conseguir unas capas ambientales fiables y biológicamente más significativas (HIJMANS *et al.,* 2005). Representan tendencias anuales, estacionalidad y factores ambientales extremos o limitantes.

Para la realización de los modelos de distribución potencial influidos por el cambio climático, se obtuvieron con una resolución de 5 minutos las mismas 19 variables bioclimáticas proyectadas al futuro del CIAT-GCM (Portal de datos del Centro Internacional de Agricultura Tropical, http://ccafs-climate.org/download_sres.html). Se eligieron las variables climáticas generadas por el Modelo de Circulación General (MCG) de la atmósfera HCCPR HadCM3 (Hadley Centre Coupled Model, version 3) desarrollado en el Hadley Centre for Climate Prediction and Research (HCCPR, Reino Uni-

do). Los datos fueron calculados por el HCCPR a partir de representaciones relativas al período 1961-1990 y distribuidos por el IPCC (Intergovernmental Panel on Climate Change).

Debido a que cada proyección de cambio climático depende de las consecuencias de la actividad humana que se realizarán a lo largo del tiempo, y no se puede asegurar como acertada una única proyección para determinado año, existen diferentes escenarios denominados SRES (Special Report on Emission Scenarios) para evaluar el cambio climático y realizar los modelos. Los SRES seleccionados en este caso fueron el A2 y el B2. El A2 representa una proyección de emisiones de CO_2 correspondientes a un elevado consumo energético (situación más pesimista en cuanto a gases de efecto invernadero se refiere) y prevé un cambio de temperatura en la superficie del aire entre los años 2071 y 2100 de 3,0ºC como promedio (en comparación con el período de 1961 a 1990; IPCC, 2001). El B2 representa una proyección de emisiones correspondientes a un bajo consumo energético y prevé un calentamiento más leve, con un cambio de temperatura entre 2071 y 2100 de 2,2ºC (IPCC, 2001). Ambos escenarios proyectan un aumento de los promedios mundiales de vapor de agua, evaporación de la misma y precipitaciones, aunque a escala regional, concretamente en el área de estudio ibérico que nos concierne, se observan aumentos en latitudes elevadas, y disminuciones leves en latitudes medias. En resumen, estos escenarios son una gama de imágenes de posibles situaciones futuras, que se construyen a partir de diversos factores (como por ejemplo contaminación de gases, uso del suelo o consumo de combustibles fósiles) y del modelo HadCM3, con los que puede simularse el clima hasta el año 2020, 2050 ó 2080.

Análisis previos

Las variables BIOCLIM podían mostrar un alto nivel de correlación entre ellas que distorsionaría los resultados obtenidos y aumentaría la redundancia de datos, por lo que se llevó a cabo una selección previa de las variables a utilizar. Se extrajeron los valores de estas capas climáticas con el programa informático Arc Gis versión 9.2 (ESRI, 2006), y a partir de ellos se calculó el nivel de correlación entre pares de variables en el área de estudio analizada gracias al programa estadístico SPSS versión 15.0 (SPSS, 2006). Siguiendo a RISSLER & APODACA (2007) cuando dos variables compartían un coeficiente de correlación de Pearson mayor que 0,8, se seleccionó la variable más significativa a nivel biológico para estas especies o aquella que resultara de más fácil interpretación. Como resultado, las variables climáticas no correlacionadas entre sí con las que se realizaron los modelos predictivos de este trabajo fueron: Bio1 (temperatura media anual), Bio2 (rango de temperatura medio mensual, obtenido como la diferencia entre la máxima y la mínima temperatura de cada mes), Bio3 (Isotermalidad), Bio8 (Temperatura media del trimestre más húmedo), Bio9 (Temperatura media del trimestre más seco), Bio12 (Precipitación anual) y Bio18 (Precipitación del trimestre más cálido).

Modelización: Mapas de distribuciones potenciales

Los modelos de distribución potencial se elaboraron con el programa Maxent versión 3.3.3 (http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/). Este aplica el principio de máxima entropía para calcular la distribución geográfica más probable para una especie. De este modo, el modelo de predicción de cada especie se materializa en un mapa que representa las áreas adecuadas o no para la presencia de dicha especie. Una explicación detallada de cómo funciona el programa se encuentra en PHILLIPS *et al.* (2006) y PHILLIPS & DUDÍK (2008).

Como formato de salida de los resultados se eligió el formato logístico por ser de más fácil interpretación (PHILLIPS & DUDÍK, 2008), ya que pueden ser interpretados como probabilidad de presencia de la especie condicionada a las características ambientales. Se consideraron los parámetros por defecto (máximo número de iteraciones: 500, límite de convergencia: 0,00001, y 10.000 puntos de fondo) como recomiendan PHILLIPS *et al.* (2006). Se realizaron 100 réplicas por modelo, utilizándose la media de cada uno de ellos para la visualización de los resultados, y el umbral de má-

xima probabilidad de presencia se ajustó al que representaba mejor los datos de presencia conocida de la especie. En todos los casos, un 25% de los registros de la muestra fueron utilizados para medir la calidad del modelo, y el 75% restante para realizar el modelo, tal y como sugieren diversos autores (PAWAR *et al*., 2007; ALBA-SÁNCHEZ *et al*., 2010). Además de esta práctica de validación simple, se aplicó el método de validación cruzada a las diferentes réplicas de los modelos

Con esta metodología se generaron para cada especie un modelo predictivo de la distribución potencial para el presente y tres proyecciones para los años 2020, 2050 y 2080 para cada uno de los dos escenarios de cambio climático (A2 y B2).

Con el programa DIVA-GIS (HIJMANS *et al.,* 2004) se calculó el número de cuadrículas predichas por los modelos por encima del umbral de máxima probabilidad, para poder valorar de manera cuantitativa los cambios acaecidos en las distribuciones de las especies.

Evaluación de los modelos predictivos

Para evaluar o medir la bondad de los modelos creados, se utilizó el valor AUC (*Area Under a Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve*). Este valor indica la capacidad de discriminación del modelo (PEARCE & FERRIER, 2000). El estadístico AUC puede tomar valores entre 0,5 y 1. Un valor de 0,5 indicaría que el modelo obtenido no es mejor que uno realizado al azar, un AUC de 0,5 a 0,7 corresponde a un modelo de baja precisión o escasa discriminación, mientras que un valor mayor de 0,7 corresponde con un modelo de elevada precisión o alta discriminación (PEARCE & FERRIER, 2000; NEWBOLD *et al.,* 2009).

Además se calculó la significación estadística de la predicción usando una prueba binomial de omisión para cada especie consistente en once tests binomiales como complemento para la evaluación del modelo: valor fijo acumulado 1; valor fijo acumulado 5; valor fijo acumulado 10; el mínimo de puntos de presencia de entrenamiento; el percentil 10 de los puntos de presencia de entrenamiento; prueba de igualdad de la sensibilidad y especificidad de entrenamiento; valor máximo de la sensibilidad más la especificidad de entrenamiento; prueba de igualdad de la sensibilidad y especificidad de prueba; valor máximo de la sensibilidad más la especificidad de prueba; balance de los puntos de omisión de entrenamiento, área predicha y valor umbral; comparación de la entropía de las distribuciones originales y consideradas a un umbral determinado (PHILLIPS *et al.,* 2006). Para que la predicción se considere admisible se requiere que todos ellos sean significativos con valores de $p<0,01$.

El valor del umbral logístico de la prueba de igualdad de la sensibilidad y especificidad de los valores de validación se utilizó para calcular porcentajes de clasificación que ayudaran a corroborar los resultados obtenidos por el estadístico AUC. Estos porcentajes se calcularon como el número de localidades de prueba con valores logísticos de probabilidad mayores que este valor umbral dividido por el número total de localidades de prueba (BALDWIN & BENDER, 2008).

Resultados

Áreas de distribución potencial

1.1. Distribución potencial actual de las especies del género *Boloria*

Las predicciones realizadas se ajustan bastante al rango de distribución actual de las especies (Figura 1). Se sitúan sobre las principales cordilleras de la zona norte de la Península Ibérica alcanzando, en determinados casos como *B. dia* o *B. selene* cordilleras más centrales.

A pesar de que en muchos casos hay un patrón de distribución coincidente situado en la cordillera Cantábrica y los Pirineos, en el caso de *B. napaea* la predicción se restringe solamente a la zona pirenaica donde se sitúan las poblaciones conocidas.

Las variables climáticas que contribuyeron en mayor medida a la elaboración de los modelos fueron la precipitación del trimestre más cálido (Bio18) y la temperatura media del trimestre más se-

co (Bio9), seguidas por la temperatura media anual (Bio1) y en el caso de *B. selene* la precipitación anual (Bio12) (Tabla I).

Especie	Variable bioclimática de mayor contribución	Porcentaje de contribución (%)
B. dia	Bio 18	52,4
	Bio 9	20,0
B. eunomia	Bio 1	55,8
	Bio 18	21,6
B. selene	Bio 9	53,1
	Bio 12	15,6
B. euphrosyne	Bio 1	33,7
	Bio 9	29,0
B. pales	Bio 1	67,7
	Bio 18	24,7
B. napaea	Bio 18	83,4
	Bio 9	7,3

Tabla I.– Porcentaje de la contribución de las dos variables bioclimáticas más utilizadas por el programa MaxEnt en la elaboración de los modelos predictivos de cada especie de mariposa del género *Boloria*. Bio1 (temperatura media anual), Bio9 (Temperatura media del trimestre más seco), Bio12 (Precipitación anual) y Bio18 (Precipitación del trimestre más cálido).

1.2. Distribución potencial futura de las especies del género *Boloria* para los años 2020, 2050 y 2080

Para cada especie se obtuvieron seis modelos predictivos de la distribución potencial: uno para el año 2020, otro para 2050 y otro para 2080 bajo los escenarios de cambio climático A2 y B2 respectivamente (Figuras 2-7). Los umbrales elegidos como probabilidad de presencia difirieron en cada especie, eligiéndose en cada caso aquel que proporcionaba la predicción más parecida a la distribución conocida de cada una de ellas. Se consideró un umbral de 0,55 para las especies *B. dia* y *B. selene*; de 0,6 para *B. euphrosyne, B. eunomia* y *B. pales;* y de 0,75 para *B. napaea.*

Se aprecia una pérdida generalizada del área de ocupación sobre la distribución potencial predicha en los modelos obtenidos a lo largo de los años en todas las especies estudiadas (Figuras 2-7; Tabla II). Este patrón fue más acusado cuando el modelo se proyectó sobre el escenario de cambio climático A2, salvo en el caso de *B. dia*, *B. pales* y *B. napaea*.

Especie	Distribución conocida	Umbral	Predicción presente	A2			B2		
				2020	2050	2080	2020	2050	2080
B. dia	547	0,55	811	581	392	204	529	391	166
B. eunomia	20	0,60	122	71	39	28	99	94	46
B. selene	474	0,55	948	510	319	78	467	292	178
B. euphrosyne	319	0,60	392	271	167	40	295	190	105
B. pales	82	0,60	144	41	0	0	15	0	0
B. napaea	8	0,75	33	44	3	0	4	8	0

Tabla II.– Número de cuadrículas UTM que conforman la distribución conocida de cada especie del género de mariposas *Boloria* y el número de cuadrículas que se obtienen en los modelos de predicción, tanto en el presente, como en el futuro para los años 2020, 2050 y 2080 bajo los escenarios climáticos A2 y B2 (ver texto). Se señala el umbral elegido para el recuento de las cuadrículas de las predicciones según la especie.

En el año 2020 las diferencias con las predicciones actuales no son notables. En el año 2050 hay un claro patrón de concentración de posibles áreas favorables en las zonas de mayor altitud de la región septentrional de la península, como son los Pirineos y algunos puntos de la cordillera Cantábrica. En el año 2080 hay una reducción drástica de las áreas favorables, llegando a desaparecer casi por completo para algunas especies, como por ejemplo *B. pales* y *B. napaea.* Otras especies como *B. dia, B. selene* y *B. euphrosyne,* todavía presentaron áreas favorables en los Pirineos y algunas cuadrículas de la cordillera Cantábrica en el año 2080, mientras que en *B. eunomia* desaparecen las poblaciones de la cordillera Cantábrica.

B. dia es la especie que presenta mayor cantidad de cuadrículas favorables en el año 2080 en el escenario A2, llegando a presentar hasta 204 cuadrículas y *B. selene* es la que presenta mayor número de cuadrículas en el escenario B2, con un total de 178 cuadrículas.

EVALUACIÓN DE LOS MODELOS PREDICTIVOS

1.1. Fiabilidad del modelo: Curva ROC y estadístico AUC

El valor AUC obtenido en los modelos predictivos realizados para las seis especies del género *Boloria* fue superior a 0,9 (Tabla III), de modo que desde este punto de vista los modelos obtenidos se pueden considerar fiables (aceptables) y más precisos que un modelo obtenido al azar.

Especie	**AUC**	**Umbral**	**% de clasificación**	**P tests binomiales**
B. dia	0,918	0,3203	82,2	<0,001
B. eunomia	0,989	0,3089	100	<0,001
B. selene	0,922	0,2931	82,1	<0,001
B. euphrosyne	0,945	0,3566	89,9	<0,001
B. pales	0,984	0,1518	95	<0,001
B. napaea	0,995	0,3011	100	<0,05[a]

Tabla III.– Valores AUC (*Area Under the ROC Curve*), valor del umbral logístico de la prueba de igualdad de la sensibilidad y especificidad de los valores de validación, porcentaje de clasificación y significación de los 11 tests binomiales realizados, para cada especie del género *Boloria* considerada en el estudio. [a] indica que uno de los once tests no fue significativo.

1.2. Significancia estadística del modelo: Once tests binomiales

De los 66 tests binomiales realizados para todas las especies del género *Boloria,* todos excepto los de *B. napaea* fueron significativos con un nivel de $p<0,001$, con lo que los modelos parecen ser fiables. Para *B. napaea* diez tests presentaron un nivel de significación de $p<0,05$ y uno de los once no resultó significativo.

1.3. Porcentaje de clasificación

Se comprobó que más del 80% de las cuadrículas de validación presentaban valores logísticos de probabilidad mayores que los requeridos para cada modelo (ver Tabla III).

Discusión

La distribución de las mariposas diurnas se ve afectada directa o indirectamente por diversos factores, entre ellos la temperatura, precipitación, latitud, altitud (MARTÍN & GURREA, 1990; HAWKINS *et al.,* 2003), o humanos (STEFANESCU *et al.,* 2004). Al analizar la influencia de las variables climáticas sobre la distribución de mariposas de montaña, donde los cambios afectan de manera más pronunciada (BENISTON *et al.,* 1997), las variables que resultaron más importantes para la creación de

las predicciones en el género *Boloria* fueron la precipitación del trimestre más cálido y la temperatura media del trimestre más seco. Ambas variables están relacionadas con el calor y la disponibilidad de agua en verano, momento en que estas especies se encuentran en la fase de adulto. En general, serían favorables áreas con temperaturas medias inferiores a 16ºC aproximadamente, temperaturas medias anuales inferiores a 8º-10ºC y precipitaciones en el trimestre más cálido superiores a 150 mm. La excepción la constituye *B. napaea* que prefiere condiciones más frías y húmedas en verano (inferiores a 10ºC y a partir de 250 mm). *B. selene* es menos selectiva, con mayores probabilidades de presencia a temperaturas veraniegas entre 15º a 20ºC y precipitación media anual entre 600 y 1.400 mm. De este modo se puede observar que con nuestros resultados, las distribuciones potenciales y conocidas del género *Boloria* se asemejan notablemente, concentrándose en las regiones montañosas de la zona septentrional ibérica, especialmente en la cordillera Cantábrica y los Pirineos. Asimismo, estas zonas coinciden con áreas de mayor diversidad de especies de mariposas (ROMO *et al.*, 2007), zonas menos perturbadas y degradadas con gran diversidad de hábitats (LOBO *et al*., 2001) y donde se han realizado los mayores esfuerzos de muestreo (ROMO & GARCÍA-BARROS, 2005).

A pesar de que se eligieron los valores umbrales para cada especie según el mejor ajuste de las predicciones a las presencias ya conocidas, las predicciones obtenidas con el mayor valor umbral no se ajustan exactamente a la distribución conocida actualmente en todos sus puntos, incluso algunos se encuentran en áreas ampliamente desfavorables. Estos puntos se consideran datos atípicos desde el punto de vista climático y pueden ser debidos a diferentes causas: errores de georreferenciación en la base de datos, identificaciones incorrectas, o debidos a la existencia de otras variables de origen no climático que no se están teniendo en cuenta y que pueden tener influencia en la distribución de estas especies. En el caso de *B. dia, B. selene, B. euphrosyne* y *B. pales* aparecen unas cuadrículas totalmente desfavorables para la distribución de estas especies y sin embargo proceden de registros en la base de datos. Estas cuadrículas se comprobaron a posteriori resultando la mayoría de ellas errores en la base de datos. Alguna de las cuadrículas era incorrecta debido a que la altitud de la cita era muy inferior a la de la cuadrícula asignada, había sitios mal georreferenciados, posibles errores de identificación de especies de alta montaña citadas a 50 m con lo que probablemente no se encontrase allí, o citas muy antiguas en las que es posible que la especie estuviese en un área climáticamente desfavorable. De este modo, parece que los modelos están siendo bastante fiables, señalando errores de la base de datos en áreas desfavorables para la supervivencia de la especie.

En relación al cambio climático, desde finales del siglo XIX se observa que la temperatura mundial aumenta progresiva e inusualmente (JACOBY & D'ARRIGO, 1997). Este aumento incide sobre los patrones de temperatura y precipitación, importantes para la distribución de las mariposas. Al extremarse las condiciones climáticas las distribuciones de las especies estudiadas deberían contraerse incrementándose su altitud media, en concordancia con la evidencia proporcionada por, por ejemplo, WILSON *et al*. (2007) o MERRILL *et al*. (2008). Las distribuciones predichas sugieren un acantonamiento en las áreas pirenaicas y cantábricas, de mayor altitud. *B. dia* restringe su distribución según los diferentes períodos considerados, pero mantendría todavía reductos ibéricos importantes en el año 2080, en los Pirineos y la cordillera Cantábrica. *B. selene* sigue una tendencia similar, siendo la segunda especie con mayor número de cuadrículas favorables en 2080, pero tiene una tendencia a la pérdida de las cuadrículas cantábricas en el escenario más drástico, al igual que *B. euphrosyne*. Las especies *B. eunomia, B. napaea* y *B. pales* ya no presentan cuadrículas favorables en la cordillera Cantábrica en 2050, y las dos últimas no presentan cuadrículas altamente favorables en 2080.

A nivel europeo este género presenta la misma tendencia que la aquí mostrada (SETTELE *et al.,* 2008). Sin embargo, la escala y el área de estudio están influyendo en los resultados obtenidos por los modelos y aunque *B. selene, B. euphrosyne* y *B. pales* muestren unas tendencias muy similares con las obtenidas por nosotros, *B. eunomia* ni siquiera presenta actualmente áreas favorables en la Península Ibérica y *B. dia* presenta un mejor pronóstico a nivel europeo para el año 2050, aunque termina equiparándose al obtenido a escala ibérica en el año 2080.

B. napaea es un caso especial. Es una especie considerada rara en el área Ibero-Balear (al igual que *B. eunomia*) (ROMO *et al.,* 2007). Cuenta con un número muy bajo de registros y se encuentra

muy localizada entre los 1.800 y los 2.500 m. A pesar de que esto no supone un problema para Maxent aparentemente (HERNÁNDEZ *et al.,* 2006*;* PHILLIPS *et al.,* 2006), los resultados obtenidos en los modelos son los menos fiables y habría que considerarlos con precaución. Si bien es cierto que el porcentaje de clasificación obtenido es el 100%, el 25% de los datos que se usan para validar el modelo partiendo de ocho datos de presencia es un número muy pequeño (dos), y es relativamente fácil que ambos puntos se hayan clasificado correctamente. Por otro lado, el número de cuadrículas favorables para la distribución de esta especie actualmente ya ha sido modelado con anterioridad con diferentes programas: Domain, estimadores no paramétricos como ACE, ICE, Chao 1 y 2, Jackknife 1 y 2, Bootstrap o un estimador asintótico como es la función de Clench (ROMO *et al.,* 2006) y GARP (ROMO, 2007). En este caso Maxent propone un mayor número de cuadrículas con condiciones climáticamente favorables para la especie, con entre 5 y 23 cuadrículas de diferencia en la predicción, pero siempre menor que el número de cuadrículas obtenido con la predicción por GARP (ROMO, 2007). Realmente la diferencia obtenida con Maxent con los primeros modelos no es tan grande, ya que en este caso se han contabilizado todas las cuadrículas de la predicción, pero es verdad que de ellas, aproximadamente 12 cuadrículas se encuentran en territorio francés, con lo que los valores se ajustan más a los obtenidos anteriormente. En definitiva, habría que intentar favorecer el estudio de esta especie, ya que es una especie que necesita unas condiciones muy específicas para su supervivencia siendo altamente vulnerable a cambios en su hábitat, y a que no se encuentra en ninguna cuadrícula UTM con más del 15% de su superficie dentro de la red de espacios naturales protegidos (ROMO *et al.,* 2007).

B. dia y *B. selene* fueron las especies que presentaron un mejor pronóstico en base al cambio climático, probablemente debido a que ambas presentan una gran diversidad de hábitats (alta montaña o claros o prados de bosque), mientras que las especies de alta montaña (*B. pales* y *B. napaea*) presentaron un panorama dramático, llegando prácticamente a extinguirse sus áreas favorables en 2050 en ambos escenarios.

Desde el punto de vista de la conservación es una situación inquietante. Se predice que hasta el año 2080 dos especies desaparecerán del área de estudio, así como una drástica reducción del área de distribución de las demás, lo que concuerda con las predicciones obtenidas a nivel europeo de una gran mayoría de especies de mariposas (SETTELE *et al.,* 2008). Cabe pensar si esta disminución de áreas favorables predicha por los modelos es suficiente como criterio para introducir a estas especies en listas rojas o debería plantearse un plan de seguimiento de las especies. La existencia de áreas climáticamente favorables por sí sola no garantiza el futuro de las especies, habría que incorporar factores locales, bióticos y dinámicos que afecten la distribución de las poblaciones. Pero si además se da el caso de desaparición de esas áreas favorables, la supervivencia de la especie se encuentra aún más amenazada, con lo que debería ponerse en marcha un plan de actuación para aplicar medidas de seguimiento de estas especies particularmente sensibles, y comprobar en un plazo más corto (10-15 años) si estas tendencias se confirman y, en caso afirmativo, proceder a la ejecución de procedimientos más drásticos a fin de prevenir la desaparición de estas especies.

A pesar de que existe una discrepancia entre diferentes autores sobre si el aumento de temperatura debido al cambio climático será más intenso (BENISTON *et al.,* 1997) o no (VUILLE & BRADLEY, 2000) en zonas de alta montaña, más estudios deben llevarse a cabo para contar con más argumentos y poder decidir al respecto (NOGUÉS-BRAVO *et al*., 2007). Nuestro caso parece apoyar la teoría de que las especies de alta montaña van a sufrir más los impactos del cambio climático, mediante una disminución en el número de áreas favorables. El aumento en altitud de las especies reducirá cada vez más las posibles zonas de colonización, perdiendo las áreas más bajas de su distribución, hasta llegar a agotar las regiones de mayor altitud a las que acudir (WILSON *et al*., 2007). Así pues, y de acuerdo con los resultados obtenidos, este factor perjudicará en mayor medida a las especies de alta montaña (alpinas o subalpinas), como *B. eunomia*, *B. pales* y *B. napaea,* que se verán afectadas por la falta de hábitats favorables en menor tiempo, y a su vez, las especies *B. dia, B. selene* y *B. euphrosyne*, que pueden perder además los claros de bosque situados a menor altitud de los que disfrutan en la actualidad.

Los modelos utilizados pueden considerarse válidos con las consideraciones comentadas anteriormente. Es verdad que la decisión sobre cuál es la mejor medida de precisión de los modelos está actual-

mente en debate, pero aunque todavía no existe un consenso, el valor del AUC (*Area Under a Receiver Operating Characteristic (ROC) Curve*) es uno de los candidatos con gran aceptación (MANEL *et al*., 2001; MC PHERSON *et al*., 2004; BENITO DEL PANDO & PEÑAS DE GILES, 2007). Véase sin embargo LOBO *et al.* (2008). La facilidad de interpretación de AUC y su independencia del umbral que se considere para identificar la presencia o ausencia de la especie en la distribución, empujan a su elección como medida de fiabilidad. Los tests binomiales fueron significativos en la mayoría de los casos indicando una buena significación estadística de los modelos. Por otra parte, los porcentajes de clasificación que se obtuvieron fueron superiores al 82% en todos los casos, por tanto una gran cantidad de las cuadrículas de validación mostraban valores correctos de predicción, recalcando la fiabilidad de los modelos.

Con el fin de aumentar la posibilidad de predecir y prevenir los efectos del cambio climático sobre la biosfera a corto o largo plazo, será necesario continuar realizando estudios que permitan conocer cada vez más y mejor lo que está sucediendo en realidad. En este caso, sería de gran ayuda ampliar el estudio utilizando otras variables no consideradas en el presente trabajo como por ejemplo las distribuciones de sus plantas nutricias, variables históricas u otras variables ambientales que puedan tener influencia sobre su distribución. Además, debido a su distribución restringida y a su susceptibilidad al cambio climático, se hace necesario el seguimiento de las poblaciones del género *Boloria* con el fin de comprobar que no cambie su estatus y necesiten ser incluidas en alguna lista roja.

Agradecimientos

Queremos agradecer a M. L. Munguira por su ayuda y orientación para realizar este estudio y a E. Yusta por su inestimable ayuda en la fase final de este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

ALBA-SÁNCHEZ, F., LÓPEZ-SÁEZ, J. A., BENITO-DE PANDO, B., LINARES, J. C., NIETO-LUGILDE, D. & LÓPEZ-MERINO, L., 2010.– Past and present potential distribution of the Iberian *Abies* species: a phytogeographic approach using fossil pollen data and species distribution models.– *Diversity and Distribution,* **16**: 214-228.

ARAÚJO, M. B. & GUISAN, A., 2006.– Five (or so) challenges for species distribution modelling.– *Journal of Biogeography,* **33**(10): 1677-1688.

ARAÚJO, M. B., PEARSON, R. G., THUILLER, W. & ERHARD, M., 2005.– Validation of species-climate impact models under climate change.– *Global Change Biology,* **11**: 1504-1513.

ARAÚJO, M. B., DEL DEDO-GARCIMARTÍN, M., POZO, I. & CALMAESTRA, R. G., 2011.– *Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de la biodiversidad española. 1. Fauna de Vertebrados*: 640 pp. Dirección General de Medio Natural y Política Forestal, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino & Museo Nacional de Ciencias Naturales (CSIC). Madrid.

BALDWIN, R. A. & BENDER, L. C., 2008.– Den-Site Characteristics of Black Bears in Rocky Mountain National Park, Colorado.– *Journal of Wildlife Management,* **72**(8): 1717-1724.

BENISTON, M., DIAZ, H. F. & BRADLEY, R. S., 1997.– Climatic change at high elevation sites: an overview.– *Climatic Change,* **36**: 233-252.

BENITO DE PANDO, B. & PEÑAS DE GILES, J., 2007.– Aplicación de modelos de distribución de especies a la conservación de la biodiversidad en el sureste de la Península Ibérica.– *GeoFocus,* **7**: 100-119.

DIDHAM, R. K., TYLIANAKIS, J. M., GEMMELL, N. J., RAND, T. A. & EWERS, R. M., 2007.– Interactive effects of habitat modification and species invasion on native species decline.– *Trends in Ecology & Evolution,* **22**(9): 489-496.

ELITH, J., GRAHAM, C. H., ANDERSON, R. P., DUDÍK, M., FERRIER, S., GUISAN, A., HIJMANS, R. J., HUETTMANN, F., LEATHWICK, J. R., LEHMANN, A., LI, J., LOHMANN, L. G., LOISELLE, B. A., MANION, G., MORITZ, C., NAKAMURA, M., NAKAZAWA, Y., OVERTON, J. MCC., PETERSON, A. T., PHILLIPS, S. J., RICHARDSON, K. S., SCACHETTI PEREIRA, R., SCHAPIRE, R. E., SOBERÓN, J., WILLIAMS, S., WISZ, M. S. & ZIMMERMANN, N. E., 2006.– Novel methods improve prediction of species' distributions from occurrence data.– *Ecography,* **29**: 129-151.

ESRI, 2006.– *ArcGIS, version 9.2*. Environmental Systems Research Institute, Redlands, CA.

FELICÍSIMO, Á. M., 2011.– *Impactos, vulnerabilidad y adaptación al cambio climático de la biodiversidad española. 2. Flora y vegetación*: 552 pp. Oficina Española de Cambio Climático, Ministerio de Medio Ambiente y Medio Rural y Marino. Madrid.

FERRIER, S. & GUISAN, A., 2006.– Spatial modeling of biodiversity at the community level.– *Journal of Applied Ecology,* **43**: 393-404.

GARCÍA-BARROS, E., MUNGUIRA, M. L., MARTÍN CANO, J., ROMO BENITO, H., GARCÍA-PEREIRA, P. & MARAVALHAS, E. S., 2004.– Atlas de las mariposas diurnas de la Península Ibérica e Islas Baleares (Lepidoptera: Papilionoidea & Hesperioidea).– *Monografías de la S. E. A.,* **11**: 1-228.

GULLAN, P. J. & CRANSTON, P. S., 2005.– *The Insects*: *An Outline of Entomology*. 3rd edition: 505 pp. Chapman & Hall, Oxford.

HAWKINS, B. A., FIELD, R., CORNELL, H. V., CURRIE, D. J., GUÉGAN, J. F., KAUFMAN, D. M., KERR, J. T., MITTELBACH, G. G., OBERDORFF, T., O'BRIEN, E. M., PORTER, E. E. & TURNER, J. R. G., 2003.– Energy, water, and broad-scale geographic patterns of species richness.– *Ecology,* **84**(12): 3105-3117.

HERNÁNDEZ, P. A., GRAHAM, C. H., MASTER, L. L. & ALBERT, D. L., 2006.– The effect of sample size and species characteristics on performance of different species distribution modeling methods.– *Ecography*, **29**: 773-785.

HIJMANS, R. J., GUARINO, L., JARVIS, A., O'BRIEN, R. & MATHUR, P., 2004.– DIVA-GIS. Versión 5.2.0.2. *Sistema de Información geográfica para el Análisis de Datos de Distribución de Especies*.– Manual. http://www.diva-gis.org

HIJMANS, R. J., CAMERON, S. E., PARRA, J. L., JONES, P. G. & JARVIS, A., 2005.– Very high resolution interpolated climate surfaces for global land areas.– *International Journal of Climatology,* **25**: 1965-1978.

HIJMANS, R. J. & GRAHAM, C. H., 2006.– The ability of climate envelope models to predict the effect of climate change on species distributions.– *Global Change Biology,* **12**: 2272-2281.

HILL, J. K., THOMAS, C. D., FOX, R., TELFER, M. G., WILLIS, S. G., ASHER, J., & HUNTLEY, B., 2002.– Responses of butterflies to twentieth century climate warming: implications for future.– *Proceedings of the Royal Society of London. Series B,* **269**: 2163-2171.

IPCC, 2001.– Climate Change 2001: The Scientific Basis. Pp.: 881. *In* J. T. HOUGHTON, Y. DING, D. J. GRIGGS, M. NOGUER, P. J. VAN DER LINDEN, X. DAI, K. MASKELL & C. A. JOHNSON (eds.).– *Contribution of Working Group I to the Third Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, New York.

JACOBY, G. C. & D'ARRIGO, R., 1997.– Tree rings, carbon dioxide, and climatic change.– *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, **94**: 8350–8353.

JIMÉNEZ-VALVERDE, A., GÓMEZ, J. F., LOBO, J. M., BASELGA, A. & HORTAL, J., 2008.– Challenging species distribution models: the case of *Maculinea nausithous* in the Iberian Peninsula.– *Annales Zoologici Fennici,* **45**: 200-210.

LOBO, J. M., CASTRO, I. & MORENO, J. C., 2001.– Spatial and environmental determinants of vascular plant species richness distribution in the Iberian Peninsula and Balearic Islands.– *Biological Journal of the Linnean Society of London,* **73**: 233-253.

LOBO, J. M., JIMÉNEZ-VALVERDE, A. & REAL, R., 2008.– AUC: a misleading measure of the performance of predictive distribution models.–*Global Ecology and Biogeography,* **17**: 145-151.

MC PHERSON, J. M., JETZ, W. & ROGERS, D. J., 2004.– The effects of species' range sizes on the accuracy of distribution models: ecological phenomenon or statistical artefact?.– *Journal of Applied Ecology*, **41**: 811-823.

MANEL, S., WILLIAMS, H. C. & ORMEROD, S. J., 2001.– Evaluating presence- absence models in ecology: the need to account for prevalence.– *Journal of Applied Ecology,* **38**: 921- 931.

MARTÍN, J. & GURREA, P., 1990.– The peninsular effect in Iberian butterflies (Lepidoptera: Papilionoidea and Hesperioidea).– *Journal of Biogeography,* **17**: 85-96.

MAXENT (http://www.cs.princeton.edu/~schapire/maxent/).

MERRILL, R. M., GUTIÉRREZ, D., LEWIS, O. T., GUTIÉRREZ, J., DÍEZ, S. B. & WILSON, R. J., 2008.– Combined effects of climate and biotic interactions on the elevational range of a phytophagous insect.– *Journal of Animal Ecology,* **77**: 145-155.

NEW, T. R., PYLE, R. M., THOMAS, J. A., THOMAS, C. D. & HAMMOND, P. C., 1995.– Butterfly conservation management.– *Annual Review of Entomology,* **40**: 57-83.

NEWBOLD, T., GILBERT, F., ZALAT, S., EL-GABBAS, A. & READER, T., 2009.– Climate-based models of spa-

tial patterns of species richness in Egypt's butterfly and mammal fauna.– *Journal of Biogeography,* **36**: 2085–2095.

NOGUÉS-BRAVO, D., ARAÚJO, M. B., ERREA, M. P. & MARTÍNEZ-RICA, J. P., 2007.– Exposure of global mountain systems to climate warming during the 21st Century.– *Global Environmental Change,* **17**(3-4): 420-428.

ORESKES, N., 2004.– The Scientific Consensus on Climate Change.– *Science*, **306**: 686.

PARMESAN, C., RYRHOLM, N. & STEFANESCU, C., 1999.– Poleward shifts in geographical ranges of butterfly species associated with regional warming.– *Nature,* **399**: 579-583.

PARMESAN, C., 2003.– Butterflies as bioindicators for climate change effects.– *In* C. L. BOGGS, W. B. WATT & P. R. EHRLICH. *Butterflies*: *Ecology and Evolution Taking Flight*: 739 pp. University of Chicago Press, Chicago.

PAWAR, S., KOO, M. S., KELLEY, C., AHMED, F. M., CHAUDHURI, S. & SARKAR, S., 2007.– Conservation assessment and prioritization of areas in northeast India: priorities for amphibians and reptiles.– *Bilogical Conservation,* **136**: 346-361.

PEARCE, J. & FERRIER, S., 2000.– Evaluating the predictive performance of habitat models developed using logistic regression.– *Ecological Modelling,* **133**: 225-245.

PEARSON, R. G. & DAWSON, T. P., 2003.– Predicting the impacts of climate change on the distribution of species: are bioclimate envelope models useful?- *Global Ecology and Biogeography,* **12**(5): 361-371.

PHILLIPS, S. J., ANDERSON, R. P. & SCHAPIRE, R. E., 2006.– Maximum entropy modeling of species geographic distributions.– *Ecological Modelling,* **190**: 231-259.

PHILLIPS, S. J., & DUDÍK, M., 2008.– Modeling of species distributions with Maxent: new extensions and a comprehensive evaluation.– *Ecography*, **31**: 161-175.

PINEDA, E. & LOBO, J. M., 2009.– Assessing the accuracy of species distribution models to predict amphibian species richness patterns.– *Journal of Animal Ecology,* **78**: 182–190.

POLLARD, E., 1988.– Temperature, rainfall and butterfly numbers.– *Journal of Applied Ecology,* **25**: 819-828.

RISSLER, L. J. & APODACA, J. J., 2007.– Adding more ecology into species delimitation: ecological niche models and phylogeography help define cryptic species in the black salamander *(Aneides flavipunctatus*).– *Systematic Biology,* **56**: 924-942.

ROMO, H., 2007.– *Diversidad geográfica de las mariposas diurnas ibero-baleares*: 279 pp. Tesis doctoral. UAM. Madrid.

ROMO, H. & GARCÍA-BARROS, E., 2005.– Distribución e intensidad de los estudios faunísticos sobre mariposas diurnas en la Península Ibérica e Islas Baleares (Lepidoptera, Papilionoidea y Hesperioidea).– *Graellsia,* **61**(1): 37-50.

ROMO, H., GARCÍA-BARROS, E. & MUNGUIRA, M. L., 2006.– Distribución potencial de trece especies de mariposas diurnas amenazadas o raras en el área ibero-balear (Lepidoptera: Papilionoidea & Hesperioidea).– *Boletín de la Asociación española de Entomología,* **30**(3-4): 25-49.

ROMO, H., MUNGUIRA, M. L. & GARCÍA-BARROS, E., 2007.– Area selection for the conservation of butterflies in the Iberian Peninsula and Balearic Islands**.–** *Animal Biodiversity and Conservation,* **30**(1): 7-27.

ROY, D. B., ROTHERY, P., MOSS, D., POLLARD, E., THOMAS, J. A., 2001.– Butterfly numbers and weather: predicting historical trends in abundance and the future effects of climate change.– *Journal of Animal Ecology,* **70**: 201-217.

SETTELE, J., KUDRNA, O., HARPKE, A., KÜHN, I., VAN SWAAY, C., VEROVNIK, R., WARREN, M., WIEMERS, M., HANSPACH, J., HICKLER, T., KÜHN, E., VAN HALDER, I., VELING, K., VLIEGENTHART, A., WYNHOFF, I., & SCHWEIGER, O., 2008.– *Climatic Risk Atlas of European Butterflies*: 710 pp. Pensoft Publishers, Sofia.

SPSS, 2006.– *SPSS for Windows (Statistical Package for Social Sciences). Versión 15.0.* SPSS Inc., Chicago, Illinois.

STEFANESCU, C., PEÑUELAS, J. & FILELLA, I., 2003.– Effects of climatic change on the phenology of butterflies in the northwest Mediterranean Basin.– *Global Change Biology,* **9**(10): 1494-1506.

STEFANESCU, C., HERRANDO, S. & PARAMO, F., 2004.– Butterfly species richness in the north-west Mediterranean Basin: the role of natural and human-induced factors.– *Journal of Biogeography,* **31**(6): 905-915.

STEFANESCU, C., TORRE, I., JUBANY, J. & PÁRAMO, F., 2011.– Recent trends in butterfly populations from north-east Spain and Andorra in the light of habitat and climate change.– *Journal of Insect Conservation,* **15**(1): 83-93.

THOMAS, C. D., CAMERON, A., GREEN, R.E., BAKKENES, M., BEAUMONT, L. J., COLLINGHAM, Y. C., ERASMUS, B. F. N., FERREIRA DE SIQUEIRA, M., GRAINGER, A., HANNAH, L., HUGHES, L., HUN-

TLEY, B., VAN JAARSVELD, A. S., MIDGLEY, G. F., MILES, L., ORTEGA-HUERTA, M. A., TOWNSEND PETERSON, A., PHILLIPS, O. L. & WILLIAMS, S. E., 2004.– Extinction risk from climate change.– *Nature,* **427**: 145-148.

THOMAS, J. A., 2005.– Monitoring change in the abundance and distribution of insects using butterflies and other indicator groups.– *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series B,* **360**(1454): 339-357.

VAN SWAAY, C. A. M. & WARREN, M. S., 1999.– Red Data Book of European Butterflies (Rhopalocera).– *Nature and Environment Series,* **99**: 1-260.

VAN SWAAY, C. A. M., WARREN, M. S. & LOIS, G., 2006. -Biotope use and trends of European butterflies.– *Journal of Insects Conservation,* **10**: 189-209.

VIVES-MORENO, A., 1994.– *Catálogo sistemático y sinonímico de los lepidópteros de la Península Ibérica y Baleares (Insecta*: *Lepidoptera) (Segunda Parte)*: 775 pp. Ministerio de Agricultura Pesca y Alimentación. Madrid.

VUILLE, M. & BRADLEY, R. S., 2000.– Mean annual temperature trends and their vertical structure in the tropical Andes.– *Geophysical Research Letters,* **27**: 3885-3888.

WARREN, M. S., HILL, J. K., THOMAS, J. A., ASHER, J., FOX, R., HUNTLEY, B., ROY, D. B., TELFER, M. G., JEFFCOATE, S., HARDING, P., JEFFCOATE, G., WILLIS, S. G., GREATOREX-DAVIES, J. N., MOSS, D. & THOMAS, C. D., 2001.– Rapid responses of British butterflies to opposing forces of climate and habitat change.– *Nature*, **414**: 65-69.

WILSON, R. J., GUTIÉRREZ, D., GUTIÉRREZ, J. & MONSERRAT, V. J., 2007.– An elevational shift in butterfly species richness and composition accompanying recent climate change.– *Global Change Biology,* **13**(9): 1873-1887.

*H. R., P. S., E. G. B.
Departamento de Biología
Universidad Autónoma de Madrid
Darwin, 2, Cantoblanco
E-28049 Madrid
ESPAÑA / *SPAIN*
E-mail: helena.romo@uam.es

*Autor para la correspondencia / *Corresponding author*

(Recibido para publicación / *Received for publication* 25-I-2012)
(Revisado y aceptado / *Revised and accepted* 18-IV-2012)
(Publicado / *Published* 30-VI-2013)

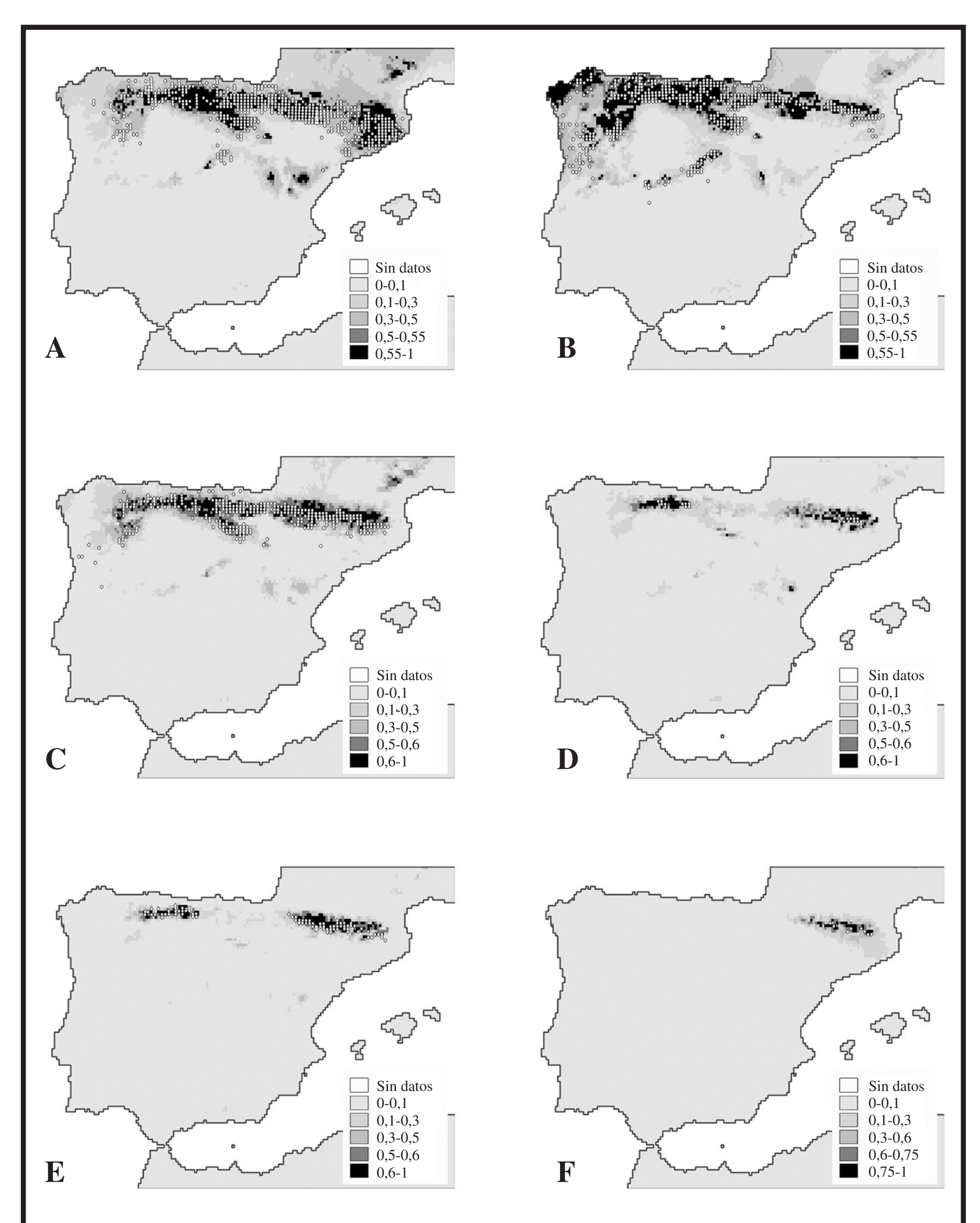


Figura 1.– Distribución potencial actual realizada con el programa MaxEnt (formato logístico) para las especies del género *Boloria* en la península Ibérica. **A**: *B. dia*; **B**: *B. selene*; **C**: *B. euphrosyne*; **D**: *B. eunomia* **E**: *B. pales*; **F**: *B. napaea.* Los tonos negros indican áreas adecuadas ambientalmente para la presencia de cada especie, disminuyendo esta favorabilidad desde los tonos de gris más oscuros a los más claros. Los puntos blancos representan la distribución actual conocida de las especies.

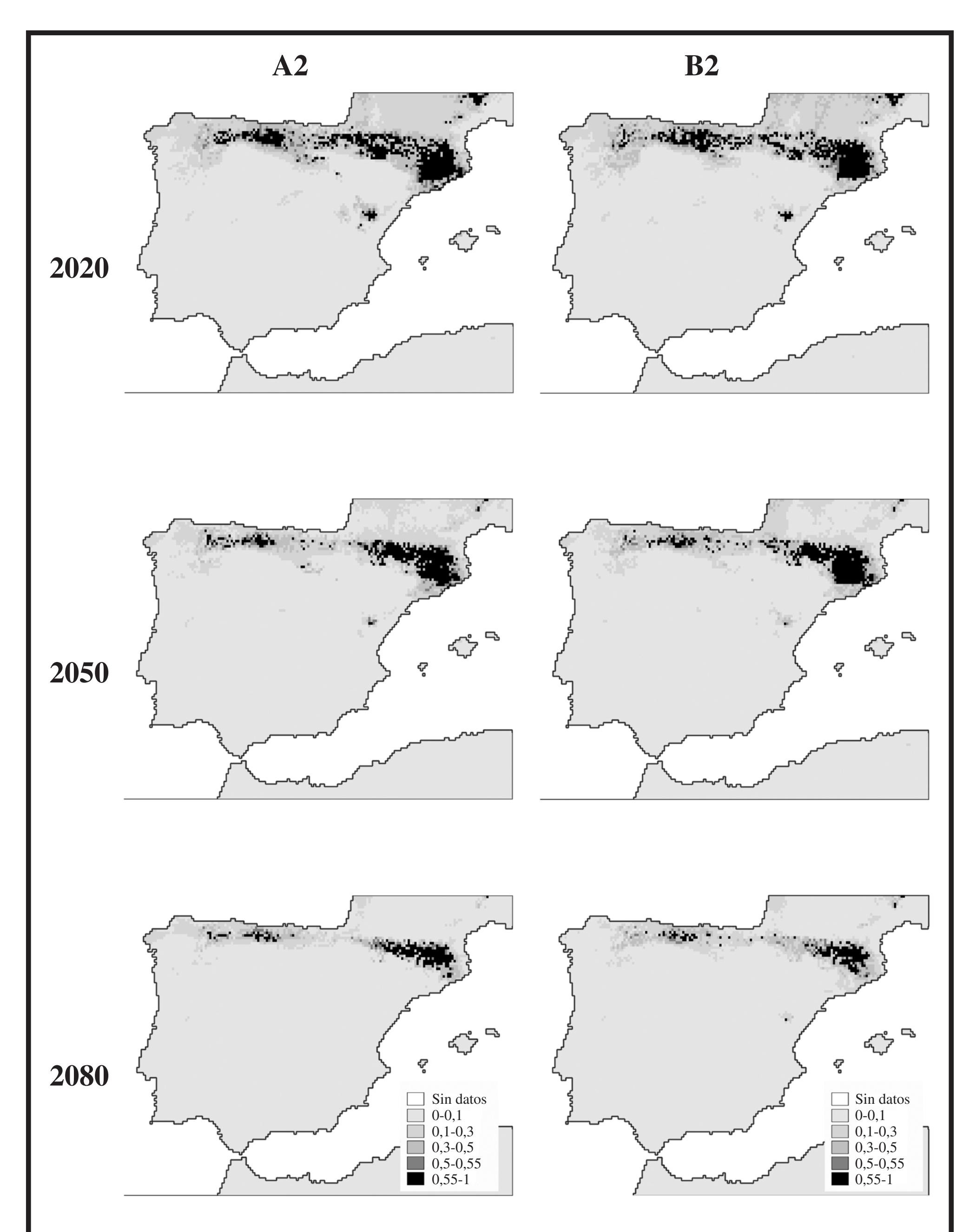


Figura 2.– Modelo de distribución potencial obtenido con el programa MaxEnt (formato logístico) proyectado bajo el escenario HadCM3 de cambio climático para el año 2020 (arriba), 2050 (centro) y 2080 (abajo), para la especie *Boloria dia* en la península Ibérica. El valor de umbral más alto donde se encuentran las cuadrículas climáticamente más favorables se representa en negro, disminuyendo su valor según la escala de grises.

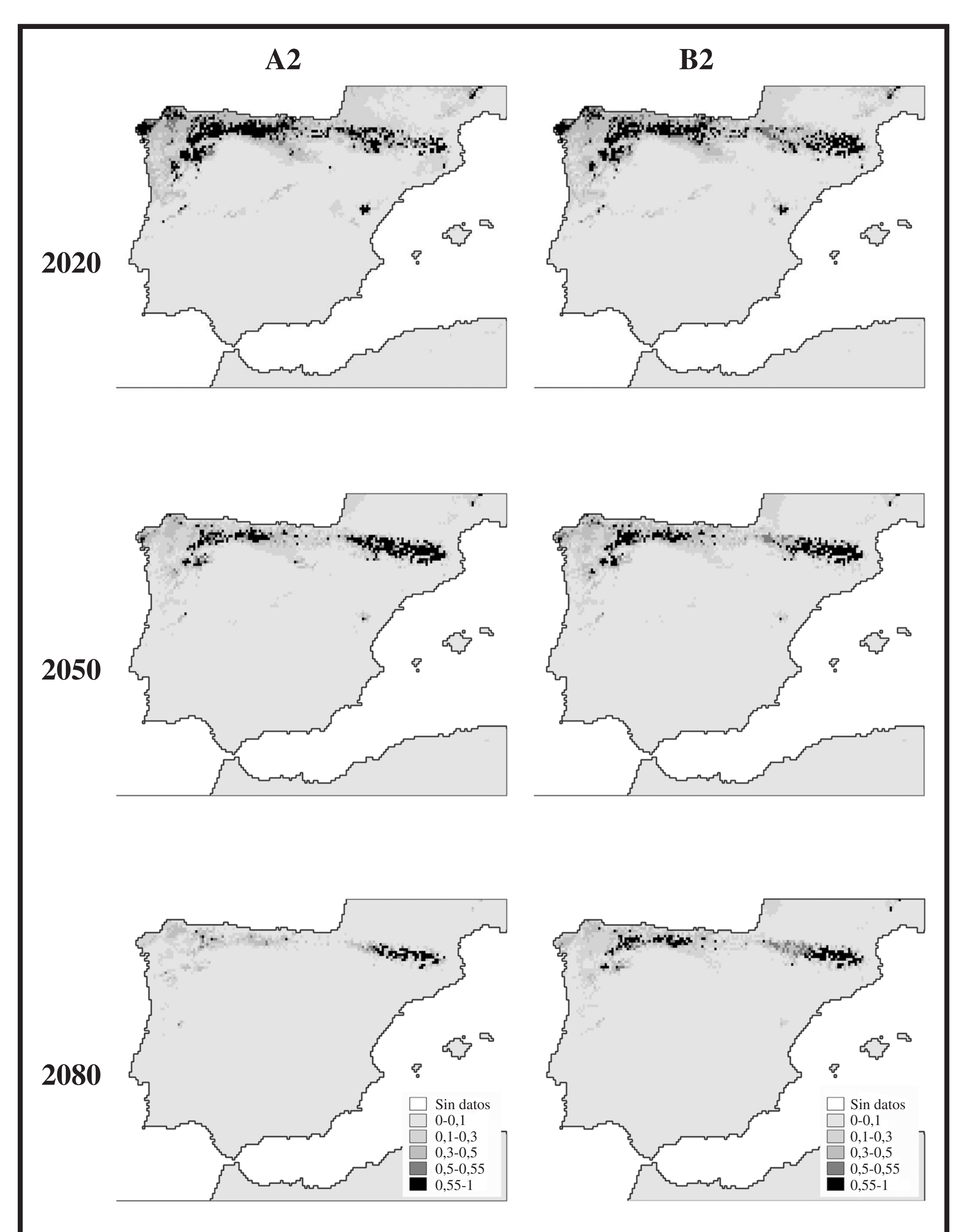


Figura 3.– Modelo de distribución potencial obtenido con el programa MaxEnt (formato logístico) proyectado bajo el escenario HadCM3 de cambio climático para el año 2020 (arriba), 2050 (centro) y 2080 (abajo), para la especie *Boloria selene* en la península Ibérica. El valor de umbral más alto donde se encuentran las cuadrículas climáticamente más favorables se representa en negro, disminuyendo su valor según la escala de grises.

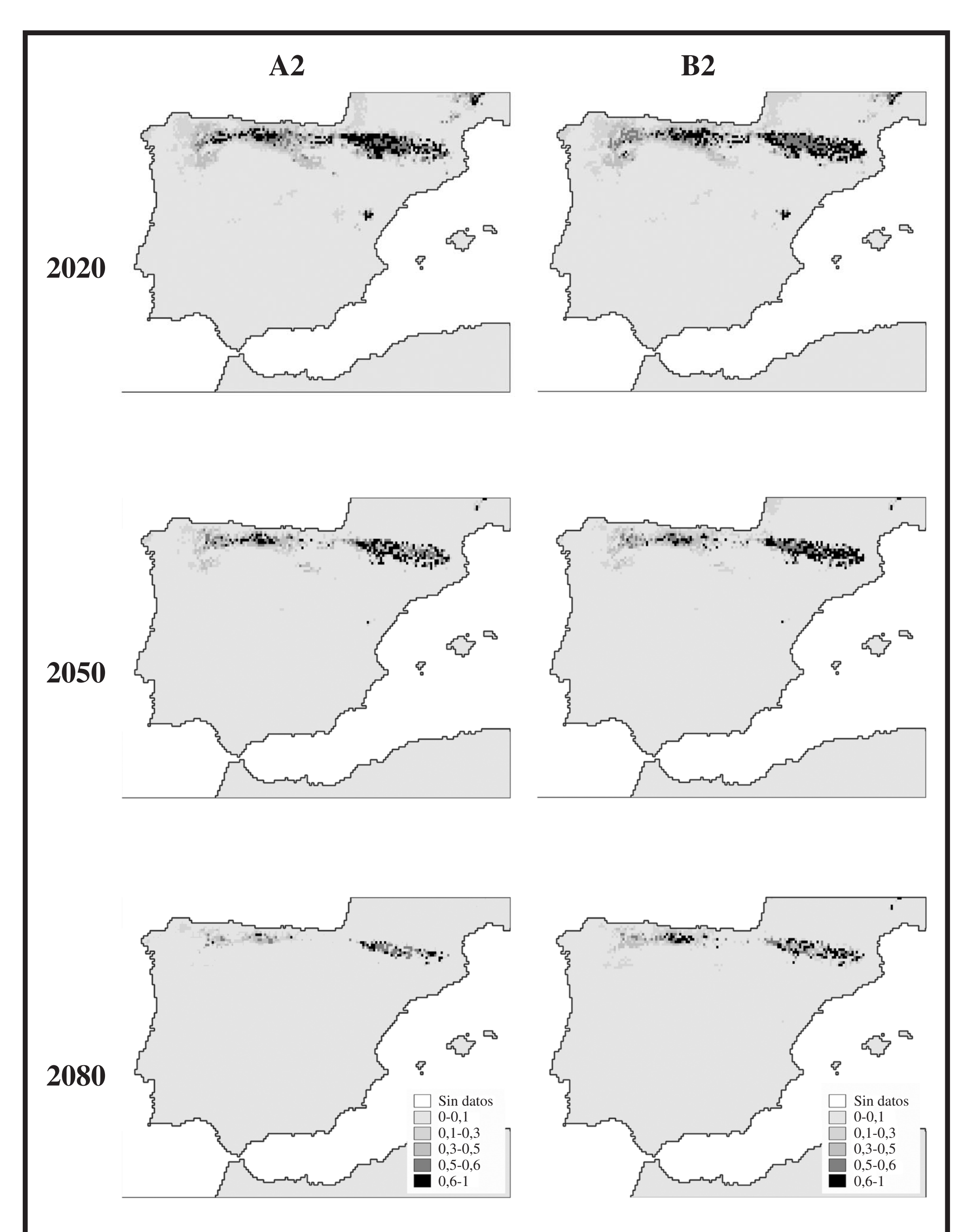


Figura 4.– Modelo de distribución potencial obtenido con el programa MaxEnt (formato logístico) proyectado bajo el escenario HadCM3 de cambio climático para el año 2020 (arriba), 2050 (centro) y 2080 (abajo), para la especie *Boloria euphrosyne* en la península Ibérica. El valor de umbral más alto donde se encuentran las cuadrículas climáticamente más favorables se representa en negro, disminuyendo su valor según la escala de grises.

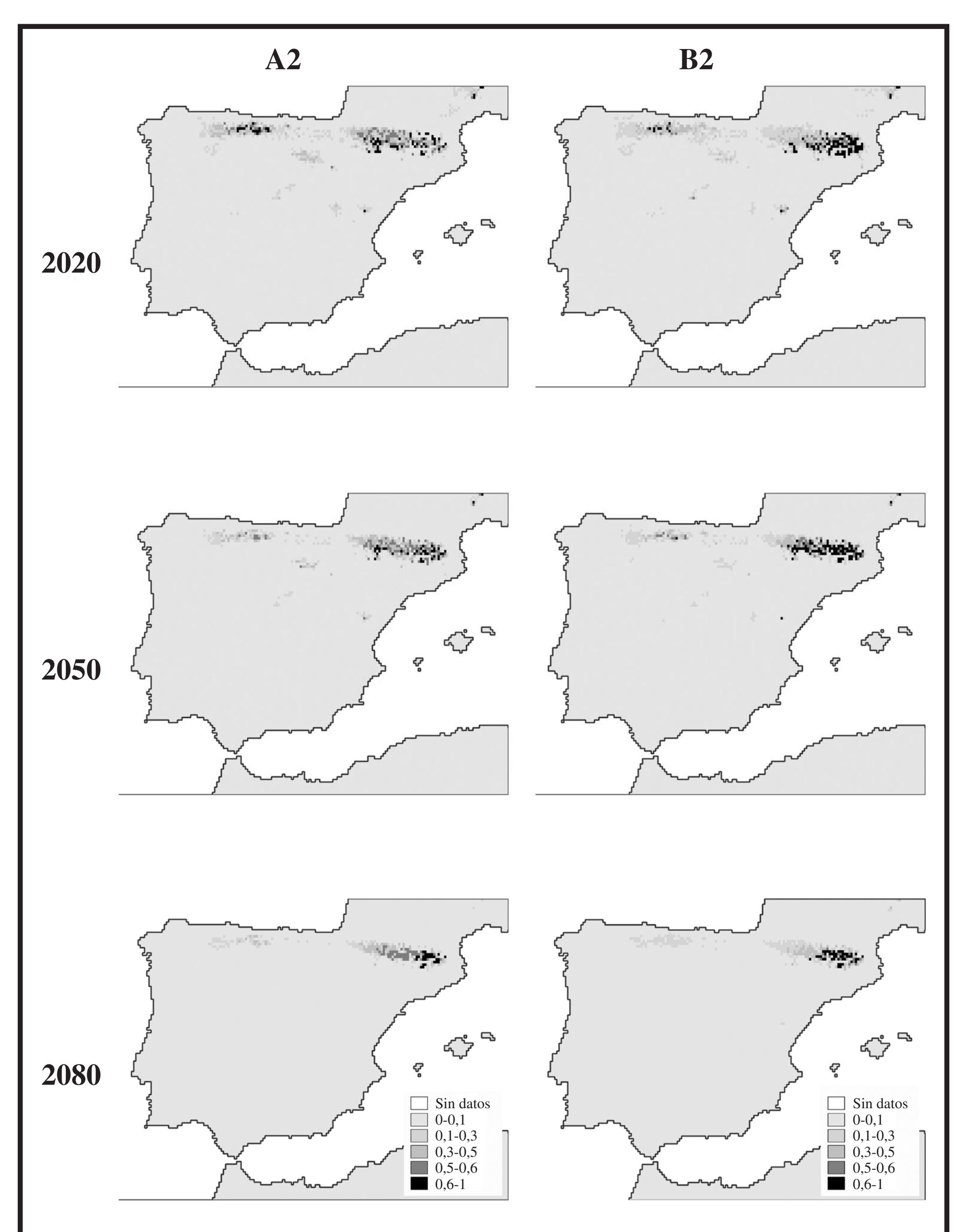


Figura 5.– Modelo de distribución potencial obtenido con el programa MaxEnt (formato logístico) proyectado bajo el escenario HadCM3 de cambio climático para el año 2020 (arriba), 2050 (centro) y 2080 (abajo), para la especie *Boloria eunomia* en la península Ibérica. El valor de umbral más alto donde se encuentran las cuadrículas climáticamente más favorables se representa en negro, disminuyendo su valor según la escala de grises.

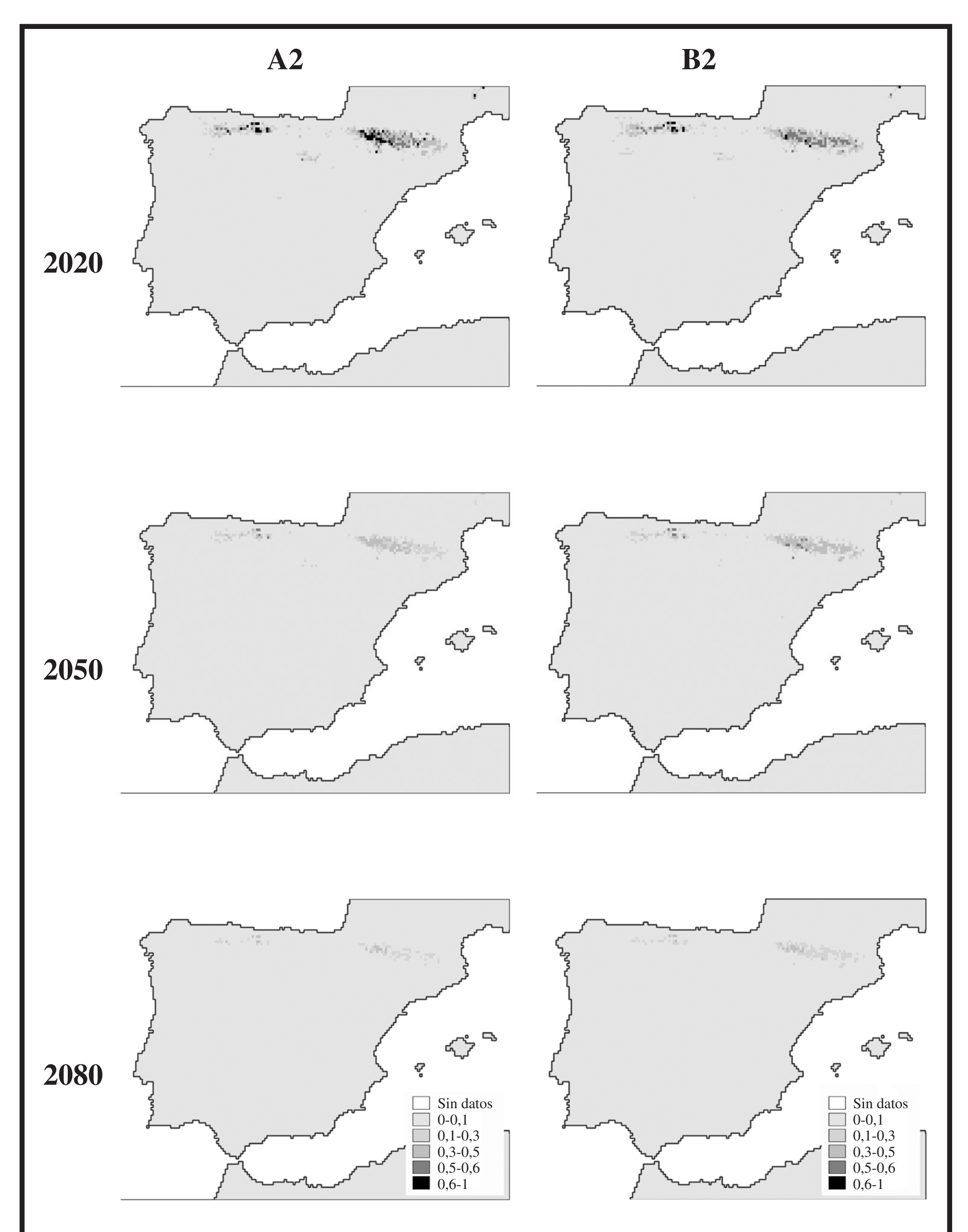


Figura 6.– Modelo de distribución potencial obtenido con el programa MaxEnt (formato logístico) proyectado bajo el escenario HadCM3 de cambio climático para el año 2020 (arriba), 2050 (centro) y 2080 (abajo), para la especie *Boloria pales* en la península Ibérica. El valor de umbral más alto donde se encuentran las cuadrículas climáticamente más favorables se representa en negro, disminuyendo su valor según la escala de grises.

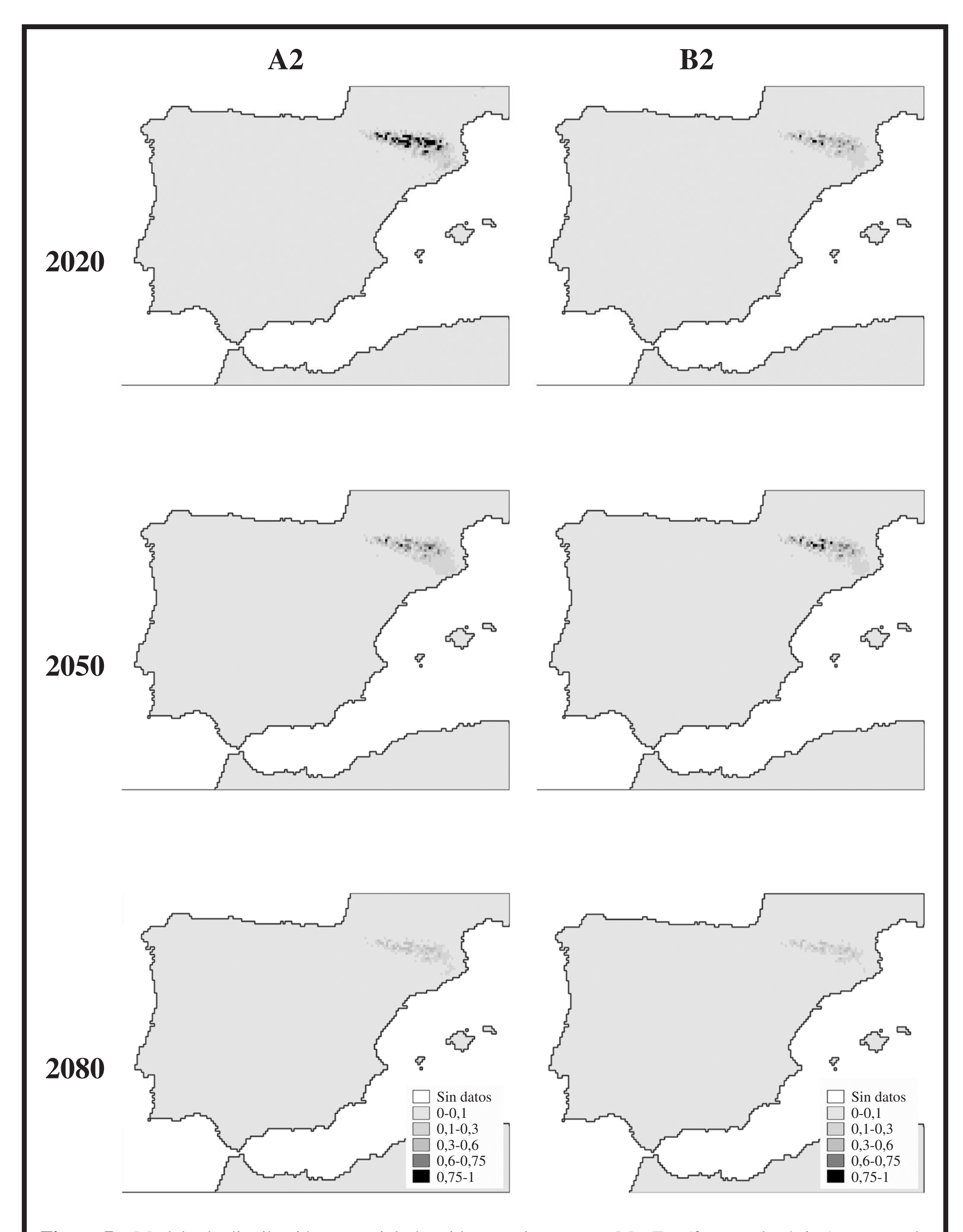


Figura 7.– Modelo de distribución potencial obtenido con el programa MaxEnt (formato logístico) proyectado bajo el escenario HadCM3 de cambio climático para el año 2020 (arriba), 2050 (centro) y 2080 (abajo), para la especie *Boloria napaea* en la península Ibérica. El valor de umbral más alto donde se encuentran las cuadrículas climáticamente más favorables se representa en negro, disminuyendo su valor según la escala de grises.